

防撞护栏对公路风吹雪雪害作用机理研究

彭国冬¹, 席建锋^{2*}, 张思源³, 李敏², 刘梓伟², 邢瑞民¹

(1. 锡林郭勒盟乾图交通设计有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026000; 2. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022;
3. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:随着中国交通强国战略的持续推进,高等级公路在路网中的比重持续增加,交通安全设施的布设数量也越来越多。内蒙古自治区锡林郭勒盟冬季漫长、风力强劲,是中国深受风吹雪灾害影响的典型地区之一,通过实地调查发现,因交通安全设施导致的“道路雪阻”“视程障碍”等公路风吹雪雪害问题日益突出,严重制约了公路交通运输功能的有效发挥,严重影响了当地经济和社会发展。其中,防撞护栏诱发风吹雪雪害的路段数和严重程度远超其他交通安全设施。因此,该文基于锡林郭勒盟公路风吹雪雪害的实地调查与分析,通过计算机仿真的方法,主要研究作为公路交通安全设施的防撞护栏对整体式公路路基断面风速流场的影响与作用规律,弥补防撞护栏对风吹雪雪害形成机理研究方面的滞后与欠缺,同时也为中国风吹雪地区公路防撞护栏的布设与雪害防治提供理论依据。

关键词:交通安全设施;防撞护栏;风吹雪;仿真分析

中图分类号:U417.1

文献标志码:A

Mechanism of Anti-Collision Guardrails to Snow Drift Disasters on Highways

PENG Guodong¹, XI Jianfeng^{2*}, ZHANG Siyuan³, LI Min², LIU Ziwei², XING Ruimin¹

(1. Xilingol League Qiantu Traffic Design Co., Ltd., Xilinhot, Inner Mongolia 026000, China; 2. Transportation College, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China; 3. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: With the continuous promotion of China's strategy of building the country with a strong transportation network, the proportion of high-grade highways in the road network continues to increase, and the number of traffic safety facilities is increasing. Xilingol League in the Inner Mongolia Autonomous Region has a long winter and strong wind, which is one of the typical areas in China deeply affected by snow drift disasters. Through field investigation, it is found that "road snow resistance" "visual range obstacle" and other snow drift disasters caused by traffic safety facilities are also increasingly prominent, which seriously restricts the effective play of road transportation functions and seriously affects the economic and social development of the region. Among them, the number and severity of road sections with snow drift disasters caused by anti-collision guardrails are far greater than those by other traffic safety facilities. Therefore, based on the field investigation and analysis of the snow drift disasters on the Xilingol League Highway, this paper mainly studied the impact and action law of the anti-collision guardrail, a highway traffic safety facility, on the wind speed and flow field of the integral highway subgrade section through computer simulation. It made up for the lag and deficiency in the research on the formation mechanism of snow drift disasters caused by anti-collision guardrails and provided a theoretical basis for the layout of highway anti-collision guardrails and snow disaster prevention in areas suffering from snow drift in China.

Keywords: traffic safety facilities; anti-collision guardrails; snow drift; simulation analysis

收稿日期:2023-08-30(修改稿)

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(编号:zdzx2018041)

作者简介:彭国冬,男,高级工程师.E-mail:penguodong315@163.com

*通信作者:席建锋,男,博士,教授.E-mail:xijf@jlu.edu.cn

0 引言

公路上发生风吹雪时,不仅可以形成视线障碍,而且随着风吹雪或降雪时间的增加,在易积雪路段,轻则将模糊或掩盖道路轮廓、交通标线和路侧交通工程设施,导致车辆通行的有效宽度降低,恶化道路通行条件,降低交通安全与管理设施的使用效能;重则会发生雪阻、中断交通,还容易酿成车毁人亡的恶性交通事故^[1]。2020年12月7日,内蒙古锡林郭勒盟境内出现特大风吹雪天气,导致G1013海张高速路锡林郭勒盟段严重雪阻,200多辆大货车滞留,对人们交通出行造成重大影响,严重降低了道路的服务水平,给救灾工作带来了极大的不便,同时使交通运输部门每年都投入大量资金用于灾害的防治。

为了科学预防和治理公路风吹雪雪害,国内外学者针对公路风吹雪雪害形成机理和防治措施进行了大量研究,并取得了丰富的研究成果。美国著名风雪流专家 Tabler^[2]通过对风雪流的大量研究,提出了各类防雪栅的作用机理、适用范围、设计和应用方法等;国内风吹雪研究学者王中隆等^[3-5]根据野外观测和风洞试验,总结了道路雪害类型和不易积雪的路基断面形式及其流场特征;李响等^[6]通过对深路堑在冬季瞬时风速条件下的风吹雪进行数值模拟,总结了深路堑风雪流运动和堆积规律;吴鹏等^[7]利用仿真分析的方法,通过防雪栅栏的水平距离、路堤高度以及边坡坡率等参数确定了雪害沉积的规律;刘庆宽等^[8]利用流场数值模拟和现场模型试验相结合的方法,研究边坡坡度对路堤积雪的形成机理;张立群等^[9]对路堤周围的风速场进行了数值模拟,分析了路堤高度对公路风吹雪的影响;任志成^[10]采用风洞试验和数值模拟,分析了不同路堤高度的路堤式公路风吹雪的积雪分布规律和特点;施佳誉等^[11]利用气象数据,结合 Google Earth 图像,从纵向和横向两个方面对公路风吹雪雪阻的分布规律及其形成机理进行了研究。

综上所述,目前国内外针对公路风吹雪雪害成因的研究,大多从公路的路基断面形式、路堤高度、边坡坡度等因素对风吹雪流场进行分析,忽视了交通安全设施对风吹雪雪害成因的影响^[12]。按照交通运输部最新发布的《国家公路网规划》,中国公路总里程达46.1万 km,其中西北、华北及西南等地区,

新规划的公路里程大幅增加。同时根据王中隆等^[13]对《中国风吹雪区划》的分析,发现上述地区大部分存在风吹雪现象。按照现行标准、规范的要求,公路交通安全设施布设规模正不断扩大,但中国风吹雪地区因其致灾的规模也越来越大,亟须从公路建设现状出发,针对性地研究公路交通安全设施风吹雪雪害形成机理,以弥补该方面研究的滞后和欠缺。

因此,本文在对内蒙古自治区锡林郭勒盟这一典型风吹雪地区公路雪害进行实地调查的基础上,分析交通安全设施对公路风吹雪雪害的影响,对影响风吹雪雪害最为严重的防撞护栏进行仿真分析,研究防撞护栏对整体式公路路基断面风速流场的影响与作用规律。

1 交通安全设施对公路风吹雪雪害影响的调查

本文选取中国风吹雪雪害典型地区——锡林郭勒盟进行公路风吹雪雪害现状调查。以锡林郭勒盟所属养护中心(原工区)为调查对象,并采取在冬季积雪期实地走访,结合调查问卷,收集相关基础资料的调查方法。

根据内蒙古自治区气象信息中心提供的2006—2020年锡林郭勒盟各气象台站观测数据可知,锡林郭勒盟积雪出现时间通常为当年10月份,结束时间通常在次年4月,降雪期平均气温在 -7°C 以下,降雪期最大积雪深度为10 cm左右;同时降雪期平均风速在3 m/s以上,这为风吹雪的发生提供了必备动力条件(风)、物质条件(雪)。

因公路风吹雪雪阻,锡林郭勒盟公路管理局对高速公路进行交通管制情况统计如表1所示。

表1 锡林郭勒盟G1013和G16高速公路雪害交通管制次数统计

Table 1 Traffic control statistics on Xilingol League G1013 and G16 highways due to snow disasters

时间	交通管制/次	时间	交通管制/次
2018.11—2019.04	30	2020.11—2021.04	78
2019.11—2020.04	56		

锡林郭勒盟养路工区管养范围内,2021年各段高等级公路的雪害路段里程占比和交通安全设施导

致的雪害路段长度如表2所示。

表2 锡林郭勒盟高等级公路的雪害路段里程占比
和雪害路段长度

Table 2 Proportion of mileage and length of sections affected
by snow disasters on Xilingol League high-grade highways

公路属地及名称	雪害里程 比例/%	雪害路段 长度/km
(锡林浩特养路工区)原G207锡海线	46.2	3.6
(锡林浩特养路工区)原G307林锡线	21.3	35.9
(锡林浩特养路工区)原S27锡张段上行	35.5	27.0
(锡林浩特养路工区)原S27锡张段下行	25.6	14.4
(锡边队养路工区)G16丹锡高速	7.5	3.2
(巴拉嘎尔高勒养路工区)原G307林锡线	16.4	14.0
(上都养路工区)S105线克旗交界至白旗交界	9.1	21.6
(上都养路工区)原S27锡张段上行	15.1	34.4
(上都养路工区)原S27锡张段下行	18.3	16.0
(多伦养路工区)G510线	47.4	14.0
(多伦养路工区)S304线	29.4	21.4
(赛罕塔拉养路工区)S101线	10.7	4.3
(宝昌养路工区)原S27线	15.8	17.1
(宝昌养路工区)G207锡海线	10.5	5.9
(宝昌养路工区)S222那沽线	11.3	0.3
(宝昌养路工区)S304宝宝线	15.6	0.3
(明安图养路工区)S105线	58.5	8.9

由表2可知:各调查路段雪害里程占比较大,2021年各雪害路段长度占养护里程的平均比例达到了18.4%,个别路段雪害占比已经超过了路段长度的40%。同时调查区内高等级公路因交通安全设施诱发的雪害里程总数达到242.3 km,其中(锡林浩特养路工区)原G307林锡线因交通安全设施诱发的雪害里程数达到了35.9 km。

统计风吹雪雪害的诱因,如图1所示。

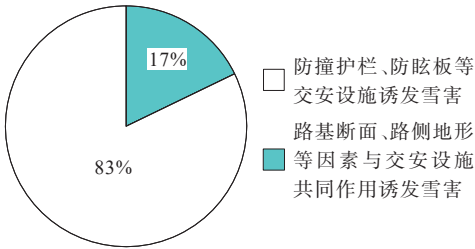


图1 雪害主要诱因分布图
Figure 1 Distribution of main causal factors of
snow disaster

从图1可以看出:由交通安全设施作为主要诱因引起风吹雪雪害的路段有274段,占比83%;由路基断面、路侧地形与交通安全设施共同作用引起风吹雪雪害的路段有57段,占比17%。

交通安全设施诱发的风吹雪危害程度、路段总数(不包括未知雪害程度路段)(75+26+116=217)以及重度雪害路段数,如图2所示。

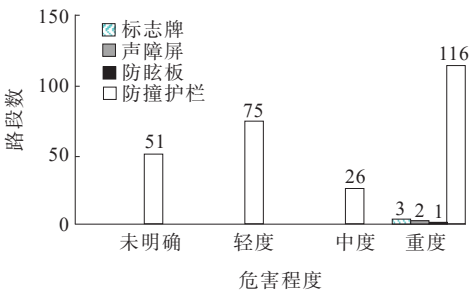


图2 交通安全设施诱发风吹雪危害程度分布图
Figure 2 Distribution map of severity of snow drift
disasters induced by traffic safety facilities

由图2可知:防撞护栏诱发重度雪害的路段116段、诱发中度危害的路段26段、诱发轻度危害的路段75段,未明确危害程度的路段51段,共计268段;由防眩板诱发的重度危害路段1段、由声屏障诱发的重度危害路段2段、由标志牌诱发的重度危害路段3段。交通安全设施中防撞护栏导致的风吹雪雪害最为频繁。

由以上调查结果可知,锡林郭勒盟是深受风吹雪雪害影响的典型地区,交通安全设施为诱发公路雪害的重要因素。与其他交通安全设施相比,防撞护栏因其设置规模相对较广,其诱发的雪害规模也相对较大。相对而言,防撞护栏对公路风吹雪的影响程度最高,因此,本文需要针对性地研究防撞护栏对风吹雪雪害的作用机理。

2 仿真模型与方法

根据锡林郭勒盟防撞护栏对公路雪害影响的调查结果,采用FLUNT软件,建立典型路基模型,对由防撞护栏引起的风吹雪雪害进行仿真分析。

2.1 护栏模型构建

在对护栏建模时需要明确护栏长度,护栏太短时,不足以表现来流经过护栏的真实场景,为排除护栏两端对整个流场的影响,护栏长度应取足够长。依据《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—

2013)中规定进行实车足尺碰撞试验时,公路波形梁护栏最小设置长度为70 m,参考此标准,在仿真计算时,选取护栏长度为100 m,足以排除两侧干扰,在对防撞护栏进行仿真时,首先应排除护栏两端对气流的影响(图3),仿真时将护栏长度设置为100 m。路侧护栏采用A级波形梁护栏,路面中央分隔带护栏采用分设型A级波形梁护栏。同时防眩板设在中央分隔带护栏中间,如图4所示。

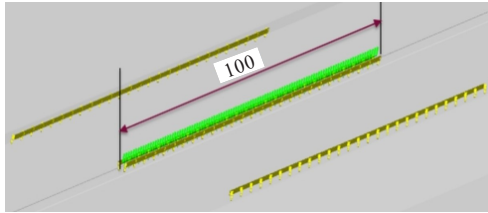


图3 护栏模型(单位:m)
Figure 3 Guardrail model (unit:m)

2.2 路基模型构建

选取锡林郭勒盟地区整体式路基,建立整体式路基模型。同时为了收集风速数据设置6个风速控制点,横向具体位置信息,如图5所示。风速控制点的纵向位置位于护栏系统中心,且为立柱之间的横梁中心点,如图6所示。各风速控制点的具体空间坐标见表3。

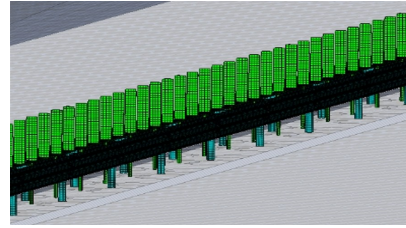


图4 中央分隔带护栏及防眩板模型
Figure 4 Central divider guardrail and anti-glare plate model

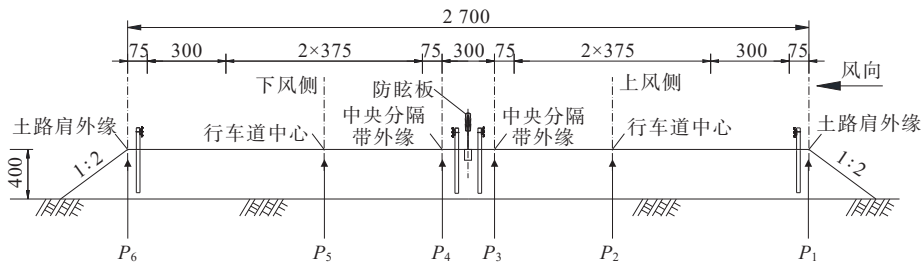


图5 整体式路基断面风速控制点(单位:cm)
Figure 5 Wind speed control points on integral subgrade section (unit: cm)

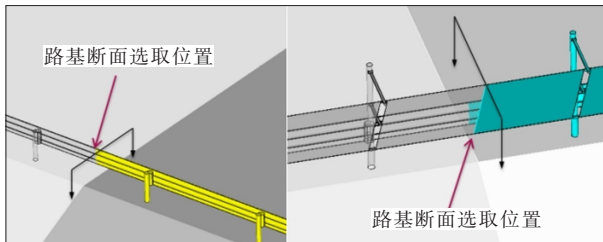


图6 路基断面选取位置
Figure 6 Location of selected subgrade sections

表3 路基断面风速控制点坐标
Table 3 Coordinates of wind speed control points on subgrade section

位置	X/m	Y/m	Z/m
P_1	-13.5	2	0
P_2	-6.0	2	0
P_3	-1.5	2	0
P_4	1.5	2	0
P_5	6.0	2	0
P_6	13.5	2	0

2.3 仿真方法

外流场的数值模拟主要以绕流风的连续性方程及动量守恒方程作为基本控制方程,并采用离散化的数值模拟方法求解流场^[14-15]。本仿真试验采用雷诺时均法(RANS)作为湍流数值模拟方法,并取标准 $k-\epsilon$ 湍流模型来计算。针对网格划分进行以下处理:护栏断面及立柱建模尺寸为20~30 mm,护栏长度方向为50 mm,倒角及连接处做细化处理。

具体仿真分析时,选取不同风速和防撞护栏条件下的路基模型,模拟分析有无防撞护栏的路面上主要控制点风速数据,进而分析路基断面风速流场及其变化规律。

2.4 边界条件及收敛性判断

设置入口为速度入口,出口为压力出口,计算域地面、两侧面及顶部为固定壁面。

收敛准则:对每个计算均运行1 000个迭代步,末100个迭代步内各残差系数不大于0.001,且各物

理量波动最大幅度不超过一定范围,则认为收敛。

3 防撞护栏对公路风吹雪的影响分析

3.1 三维流场总体特征

由于防撞护栏的截面不规则并且多棱角边或上下分区,从流体力学原理上来说,对于风流动表现为钝体形状,成为风流经路面的障碍物,造成局部扰动,引起速度场和压力场的变化,因而造成气流的阻塞作用,使周围的流场分布发生了改变,这也是造成雪害的主要因素。

仿真分析结果也同样表明:在有防撞护栏的情况下,防撞护栏对公路的三维流场产生了明显的影响,如图7、8所示。

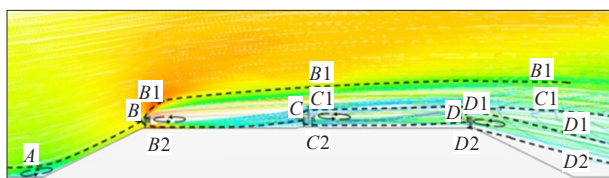


图7 断面流场图

Figure 7 Section flow field

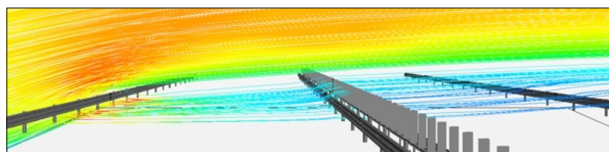


图8 三维流场图

Figure 8 Three-dimensional flow field

由图7可知:当来流到达上风侧土路肩坡脚时,在坡脚A处产生回旋,接近上风侧护栏时,在护栏迎风面,略高截面中心处有一个停滞点B,此处压力最大,气流在B处发生分离,部分气流(B1)越过护栏上方,部分气流(B2)从护栏下方穿过。护栏背风面有一抽空区域充满着低速回流漩涡,在此环向流区域末端与B2气流汇合。此时气流与来流方向相同,但因护栏阻挡,有很长一段距离内风速度降低,直至接近中央分隔带护栏,因为中央分隔带护栏断面与路侧护栏类似,所以气流在中央分隔带护栏的C处发生分离,分离后形成护栏上方C1和下方C2两部分气流,并且在中央分隔带护栏背部也形成一个低速气流回旋的空腔区域,而后环向流末端与C2气流汇合,在接近下风侧护栏D处,分离为越过护栏的D1和穿过护栏下方的D2,而又因为下风侧土路肩的影响,再加上越过上风侧护栏的B1,越过中央分隔带护栏的

C1,穿过下风侧护栏的D1和D2,四股气流相互影响,在下风侧护栏背部气流回旋范围扩大,形成了很长的低速流区域。

3.2 断面流场规律分析

来流穿过护栏时,会在护栏迎风面处发生分离,一部分气流从护栏上端越过并上扬,上扬的高度由护栏高度决定,护栏越高,上扬就越高;一部分气流从护栏下部穿过,并与路基触碰。由于护栏截面两侧压差极大,形成了以护栏迎风面为顶点的开口向路基的类似抛物线的等速线。不论是上扬还是下穿的气流,经过护栏后都会加速,上扬加速的区域位于护栏顶端,朝上部空间呈伞状;下穿加速的区域,朝路基方向呈三角形,如图9所示。

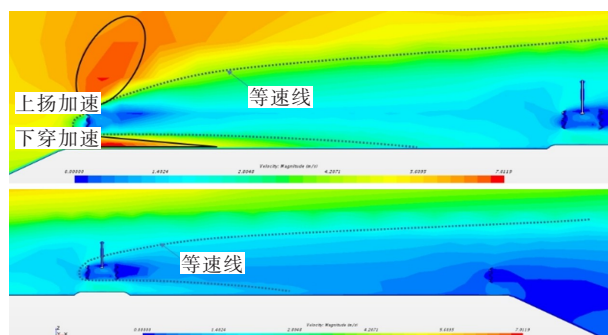


图9 设置防撞护栏流场等速线分布图

Figure 9 Isovelocity distribution of set anti-collision guardrail flow field

有防撞护栏的路基表面压力以上风侧护栏为界限,护栏的背面为正压区,且截面正前方区域压力最大;上风侧护栏正面、中央分隔带护栏、下风侧护栏,直至下风侧土路肩、下风侧土路肩坡脚处都呈负压,如图10所示。其原因可能为:气流在迎风侧坡脚处,经跛脚形状的影响,导致速度降低,压力升高;紧接着经过土路肩后,由于护栏的阻碍作用,速度降低,压力升高,在护栏的迎风面达到最大,形成了护栏迎风面的集中正压区。经护栏后,越过护栏上方和穿过护栏下部的气流,速度很快,压力迅速降低,从而形成了护栏背风面集中负压区。经过一段平稳的路基后,压力有所上升,但一直保持在负压状态。气流在经过中央分隔带护栏时,护栏两侧形成很小的压力略微升高区,但是升高的幅度已大大减小;气流经过下风侧护栏时,护栏两侧压力变化非常小,此时气流速度也很小,而后经过下风侧跛脚,一直保持在很低的速度。

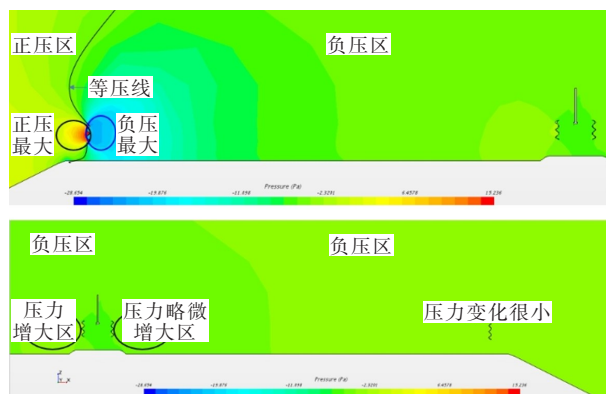


图 10 设置防撞护栏下护栏两侧压力云图

Figure 10 Pressure cloud map of set anti-collision guardrail on both sides

3.3 防撞护栏对风吹雪的影响分析

为探究防撞护栏对风吹雪雪害的影响,本文采用对照试验,首先明确未设置防撞护栏下路基断面流场的变化,再与设置防撞护栏下路基断面流场进行对比,从而明确路基防撞护栏对风吹雪雪害的影响机理。

本文对风速的设置来自锡林郭勒盟冬季风速的实地调查,统计得到发生风吹雪现象时风速为 5.0~17.0 m/s。因此将仿真风速设置为 5.4 m/s、10.7 m/s、17.1 m/s,其中 5.4 m/s、10.7 m/s、17.1 m/s 为国家风力等级划分标准中 3 级风、5 级风和 7 级风的风速上限,从而分析在不同风速条件下风吹雪雪害的变化规律。

3.3.1 无防撞护栏下流场风速变化

选取不同的仿真风速,分析不同风速下无防撞护栏对路基断面流场的影响。无防撞护栏下路面控制点风速值见表 4,根据表 4 得到不同仿真风速下路面控制点风速变化规律如图 11 所示。

表 4 无防撞护栏下路面控制点风速值

Table 4 Wind speed values at control points on road without anti-collision guardrails

位置	X/m	不同仿真风速(m/s)下控制点风速/(m·s ⁻¹)		
		5.4	10.7	17.1
P ₁	-13.5	8.56	17.10	27.48
P ₂	-6.0	3.65	7.47	12.16
P ₃	-1.5	3.71	7.56	12.29
P ₄	1.5	3.77	7.70	12.50
P ₅	6.0	3.93	8.01	13.02
P ₆	13.5	6.91	14.08	22.86

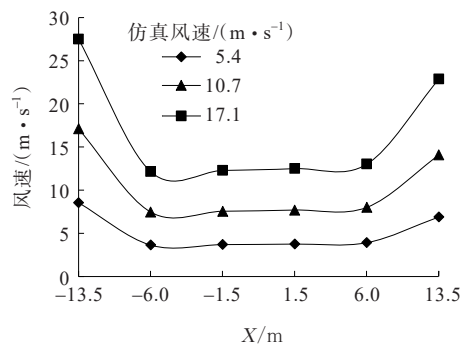


图 11 不同仿真风速下路面控制点风速变化

Figure 11 Wind speed variation at control points on road under different simulated wind speeds

由表 4 及图 11 可知:

风速变化规律较为相似,风速均呈先下降后增加的趋势;并且当入口风速越大,风速变化幅度越明显。因此,选取仿真风速为 17.1 m/s 进行具体分析,得到风速云图及风速矢量图如图 12、13 所示。

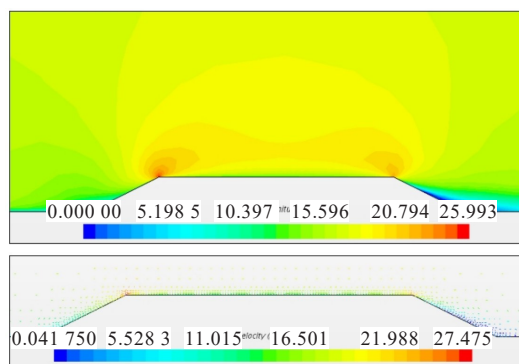


图 12 无防撞护栏下风速云图(单位:m/s)

Figure 12 Wind speed cloud map without anti-collision guardrails(unit:m/s)

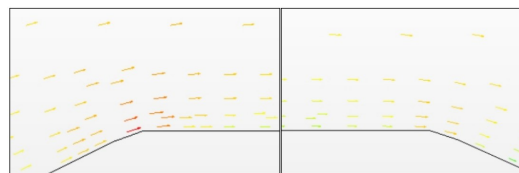


图 13 无防撞护栏下风速矢量图

Figure 13 Wind speed vector diagram without anti-collision guardrails

由图 12、13 可知:在无防撞护栏的情况下,上风侧气流在遇到路基后,会在路基坡脚处形成涡流,紧接着由于边坡断面变化导致气流的过流断面缩小,使气流风速逐渐提高并在上风侧土路肩处达到最大。随后气流通过上风侧土路肩时,受其形状影响

形成涡流,受涡流影响导致风速会迅速下降并在上风侧行车道中心处达到最小。最后当风到达下风侧土路肩处时,又由于边坡断面的变化使风速迅速提高。

3.3.2 设置防撞护栏下流场风速变化

选取不同的入口风速,分析不同风速下设置防撞护栏对路基断面流场的影响。表5为设置防撞护栏下路面控制点风速值,图14为根据表5得到的不同仿真风速下路面控制点风速变化图。

表5 设置防撞护栏下路面控制点风速
Table 5 Wind speed at control points on road with anti-collision guardrails

位置	X/m	不同仿真风速(m/s)下控制点风速/(m·s ⁻¹)		
		5.4	10.7	17.1
P ₁	-13.5	5.64	11.29	18.12
P ₂	-6.0	2.89	5.85	9.43
P ₃	-1.5	1.56	3.17	5.11
P ₄	1.5	1.29	2.63	4.21
P ₅	6.0	0.87	1.80	2.85
P ₆	13.5	0.44	0.95	0.72

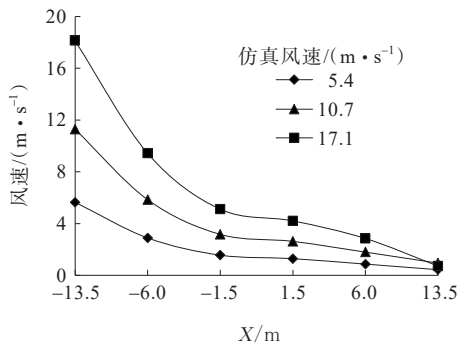


图14 不同仿真风速下路面控制点风速变化
Figure 14 Wind speed variation at control points on road under different simulated wind speeds

由表5及图14可知:变化规律大致相同,都呈现风速逐渐下降趋势;但是入口风速越大,路面风速变化幅度越大。因此,选取仿真风速为17.1 m/s进行具体分析。当选取仿真风速为17.1 m/s,得到的风速云图及风速矢量图如图15、16所示。

由风速云图及风速变化情况可知:设有防撞护栏时,气流经过上风侧路侧护栏时,受护栏断面不规则形状影响,将气流分为两部分,护栏上部分离气流上扬并加速,护栏下部分离气流吹至路基并加速,因护栏背部受挡,形成一段距离的低速带。受路侧护

栏处漩涡影响,导致上风侧土路肩处控制点风速降低,同时也因为路侧护栏、中央分隔带护栏等对路面风速流场的叠加影响,路面上方出现大范围的弱风区,使得中央分隔带护栏下部的加速作用不明显,风速从上风侧至下风侧总体呈下降趋势且降幅较大,极易导致积雪,这说明防撞护栏是风吹雪致灾的主要影响因素之一。

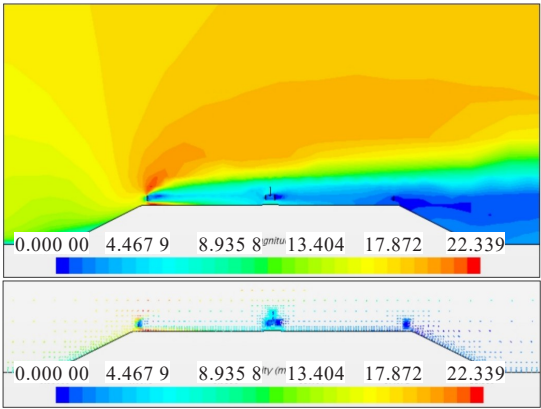


图15 设置防撞护栏下风速云图(单位:m/s)
Figure 15 Wind speed cloud map with anti-collision guardrails (unit:m/s)

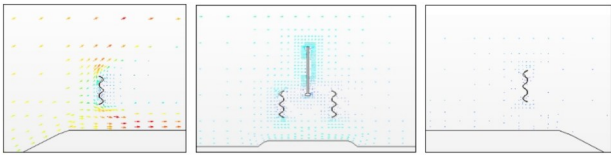


图16 设置防撞护栏下风速矢量图
Figure 16 Wind speed vector diagram with anti-collision guardrails

4 结论

基于内蒙古自治区锡林郭勒盟野外实地观测调研,采用仿真分析的方法,建立了整体式路基路面模型和防撞护栏模型,通过分析防撞护栏这一交通安全设置对风吹雪雪害的作用机理,得出以下结论:

(1) 对调研结果的统计分析发现,锡林郭勒盟是受风吹雪雪害影响的典型地区,而交通安全设施是诱发雪害的重要因素。在交通安全设施中,防撞护栏对风吹雪的影响程度最大,防眩板、交通标志牌以及其他交通安全设施对风吹雪的影响较小。

(2) 分析防撞护栏对风吹雪雪害形成机理表明:防撞护栏可以大幅度降低路面风速,从而使大量雪粒子堆积。因此,在雪害易发路段设置防撞护栏后,宜在路侧布设防雪设施,以使雪粒子提前堆积,或设

置导雪设施,防止雪粒子在路面堆积。

参考文献:

References:

- [1] 高鹏飞.公路风吹雪雪害防治技术研究[D].西安:长安大学,2009.
GAO Pengfei.Study on prevention and control technology of snow damage caused by wind and snow on highway[D].Xi'an:Chang'an University,2009.
- [2] TABLER R D.Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design[R]. Final Report NCHRP Project, Niwot, Colorado, America(Tabler and Associates), 2003.
- [3] 王中隆,白重媛,陈元.天山地区风雪流运动特征及其预防研究[J].地理学报,1982,37(1):51-64.
WANG Zhonglong,BAI Zhongyuan,CHEN Yuan.A study on the movement of snow drift in TianShan and its control [J].Acta Geographica Sinica,1982,37(1):51-64.
- [4] 王中隆,风雪流及其防治方法[M].北京:人民交通出版社,1978.
WANG Zhonglong. Wind and snow flow and its prevention methods[M]. Beijing: China Communications Press,1978.
- [5] 王中隆,潘遐华,刘贤万.路堑和隧道风雪流的风洞模拟实验研究[J].地理学报,1988,43(3):265-273.
WANG Zhonglong,PAN Xiahua,LIU Xianwan.Simulation research of snow drift on the cut and tunnel in wind-tunnel [J].Acta Geographica Sinica,1988,43(3):265-273.
- [6] 李响,高晖,吴燕青,等.深路堑风吹雪运动与堆积规律研究[J].公路,2021,66(12):381-384.
LI Xiang, GAO Hui, WU Yanqing, et al. Study on the movement and accumulation law of snow blowing by wind in deep cutting[J].Highway,2021,66(12):381-384.
- [7] 吴鹏,陈发明,刘健,等.基于Fluent防雪栅栏数值仿真研究[J].交通科技与经济,2016,18(6):57-60.
WU Peng, CHEN Faming, LIU Jian, et al. Research on numerical simulation of snow fence based on Fluent[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2016,18(6):57-60.
- [8] 刘庆宽,梁朋飞,高岭,等.边坡坡度对路堤风吹雪影响研究[J].振动与冲击,2021,40(3):87-94.
LIU Qingkuan,LIANG Pengfei,GAO Ling,et al.Effects of side slope inclination on drifting snow of embankment[J]. Journal of Vibration and Shock,2021,40(3):87-94.
- [9] 张立群,熊航,余泽韬,等.路堤高度对公路风吹雪影响规律的数值模拟研究[J].河北建筑工程学院学报,2021,39(4):12-16,23.
ZHANG Liqun,XIONG Hang,YU Zetao,et al.Numerical simulation study on the influence law of embankment height on wind-blowing snow on highway[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2021,39(4):12-16,23.
- [10] 任志成.风吹雪地区典型路基断面积雪分布规律及防治技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
REN Zhicheng.Research on snow distribution pattern and prevention technology of typical subgrade section in wind-blown snow area[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2020.
- [11] 施佳誉,徐冬英,夏才初,等.公路风吹雪雪阻分布规律及雪灾形成机理研究[J].公路,2020,65(1):257-264.
SHI Jiayu,XU Dongying,XIA Caichu,et al. Research on the distribution law of snow blockage of snow drift on road and the formation mechanism of snow disaster[J]. Highway,2020,65(1):257-264.
- [12] 林起飞,张立群,杨欢欢,等.高速公路附属设施对加深风吹雪灾害程度的数值模拟研究[J].河北建筑工程学院学报,2021,39(2):42-47.
LIN Qifei, ZHANG Liqun, YANG Huanhuan, et al. Numerical simulation research on the auxiliary facilities of expressway to deepen the degree of snowdrift disaster [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering,2021,39(2):42-47.
- [13] 王中隆,张志忠.中国风吹雪区划[J].山地学报,1999,17(4):312-317.
WANG Zhonglong,ZHANG Zhizhong.Regionalization of snow drift in China[J].Journal of Mountain Research,1999, 17(4):312-317.
- [14] 张林林.公路风吹雪雪害仿真技术研究[D].长春:吉林大学,2005.
ZHANG Linlin.Research on snowdrifts and snow disaster simulation technology of road[D]. Changchun: Jilin University,2005.
- [15] 李鹏翔.阿富准铁路风吹雪灾害形成机理与防治技术研究[D].北京:北京交通大学,2019.
LI Pengxiang. Study on formation mechanism and prevention technology of wind and snow disaster on Afuzhun Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.